



Mitigación de interferencias electromagnéticas AC

en configuraciones complejas de múltiples electroductos-gasoductos

Por **Ing. Germán Mancuso** (Camuzzi Gas S.A.) y **Hernán Babino** (Cathodic Protection Specialist NACE)

Trabajo seleccionado por el *Comité Organizador del 2º Congreso de Integridad en Instalaciones en el Upstream y Downstream de Petróleo y Gas.*

En este trabajo se exponen las acciones realizadas por Camuzzi Gas en dos gasoductos de Puerto Madryn, con distinto tipo de revestimiento pero ambos interferidos electromagnéticamente por el Electroducto Futaleufú-Aluar; se verificaron sobre la cañería valores de inducción de alterna de hasta 180VAC y potenciales cañería-suelo positivos; se investigan las causas de la disminución de la eficiencia de los sistemas de mitigación instalados durante la construcción.

La presencia de inducciones electromagnéticas en cañerías de acero enterradas es el principal efecto causado por la cercanía de Líneas de transmisión de Alta Tensión (LAT) que comparten el mismo derecho de vía. Los niveles de inducción que se registran en las cañerías son proporcionales a las corrientes transportadas por las líneas y por la geometría conjunta que presenta el sistema Electroductos-Gasoductos, lo que hace que dicha inducción electromagnética sea variable, no solo en el tiempo sino también en magnitud a lo largo del gasoducto.

En condiciones normales de operación, estas corrientes y voltajes inducidos sobre las cañerías pueden provocar daños al personal (y terceros), y también pueden acelerar procesos corrosivos externos ante la presencia de fallas en el revestimiento, comprometiendo la integridad del gasoducto en cuestión, que puede derivar en fugas o reventones y la consiguiente interrupción del servicio.

Bajo estas condiciones, los sistemas de protección catódica instalados en los gasoductos también se ven interferidos, verificando bajos niveles de eficiencia y rendimiento en las zonas fuertemente inducidas.

Los diseños de sistemas de mitigación de inducciones electromagnéticas en cañerías enterradas se tornan aún más complejos si, en vez de uno, son dos electroductos de alta tensión que interfieren al mismo tiempo a dos cañerías paralelas con distintos tipos de revestimientos.

Este trabajo comparte la experiencia y acciones llevadas a cabo por Camuzzi Gas en dos gasoductos paralelos de 12" y 61 km de longitud, que alimentan a la ciudad de Puerto Madryn y la planta de aluminio de Aluar en esa ciudad argentina, construidos con una diferencia de 10 años y que poseen distinto tipo de revestimiento (A1 y G4).

Estas cañerías se encuentran interferidas electromagnéticamente por el Electroducto Futaleufú-Aluar, constituido por dos ternas de 330 kV. Las cañerías corren paralelas al electroducto a lo largo de 46 km, a una distancia de 50 metros. En los momentos más críticos se verificaron sobre la cañería valores de inducción de alterna de hasta 180VAC y potenciales cañería-suelo positivos.

Se investigan las causas de la disminución de la eficiencia de los sistemas de mitigación instalados durante la construcción y los problemas originados en el sistema para lograr niveles de protección catódica adecuados.

Se muestran también las simulaciones computacionales del sistema "Electroducto-Gasoducto", las mediciones y trabajos de campo que derivaron en el diseño y construcción de estaciones de mitigación de inducción de alterna y un nuevo sistema de protección catódica. Por último, se analizan los resultados, se evalúa mediante el método ECDA la integridad de las cañerías, y se presenta un estudio comparativo de velocidades de corrosión con y sin sistema de mitigación.

Introducción

La corrosión del acero causada por la presencia de corriente $-AC[1]$ es conocida e investigada desde finales de los años '20. La velocidad de este tipo de corrosión es solo una pequeña fracción de la que ocurre por su equivalente en corriente $-DC$. Durante mucho tiempo se creyó que los efectos de la corrosión- AC podían ser controlados por la aplicación de protección catódica, sin embargo, entre 1986 y 1990 ocurrieron las primeras fallas en cañerías enterradas y protegidas catódicamente atribuidas a corrosión $-AC$.

Las diferencias de potencial y corrientes son inducidas electromagnéticamente en una cañería de la misma forma que el devanado primario lo hace sobre el devanado secundario en un transformador. La corriente eléctrica que circula por un conductor de "LAT" genera un flujo magnético " Φ ". La intensidad de la corriente inducida " I_2 " por este flujo magnético es directamente proporcional a la magnitud de corriente " I_1 " que circula por el conductor, e inversamente proporcional a la distancia " D " entre la cañería y el conductor eléctrico (figura 1).

Por otro lado, por Ley de Faraday, para que se produzca esta inducción la cañería debe cortar o atravesar líneas de flujo magnético " Φ " variable, y esto se produce cuando la cañería corre paralela a la línea eléctrica.

A medida que aumenta la longitud en que la cañería y la línea eléctrica corren en paralelo, mejora el acoplamiento electromagnético entre ellas, de la misma manera que un transformador aumenta su eficiencia al aumentar el número de vueltas de las bobinas primarias y secundarias.

Al análisis anterior se debe agregar que los sistemas de transmisión eléctrica de alta tensión están constituidos por ternas de fase R-S-T de igual módulo y separadas 120° cada una, por lo cual las tensiones y corrientes inducidas en la cañería serán la resultante (en módulo y fase) de la suma vectorial de cada una de las inducciones que produce cada fase independientemente (figura 2), despreciando para simplificar este análisis, los efectos de las inducciones mutuas y autoinducciones descriptas por la Ley de Lenz.

A grandes rasgos, se pueden mencionar los factores que intervienen en el fenómeno de inducciones electromagnéticas sobre cañerías de acero:

- Cantidad de fases del sistema LAT [2]
- Ángulos de fase
- Corriente de transporte de LAT (I en [A])
- Configuración de la torre de LAT
- Separación entre fases (R-S-T)
- Altura LAT
- Separación entre torre de LAT y cañería (geometría)
- Discontinuidades (en la geometría)
- Cañería (ϕ (diámetro), longitud, profundidad)
- Resistividad del terreno
- Calidad del revestimiento de la cañería

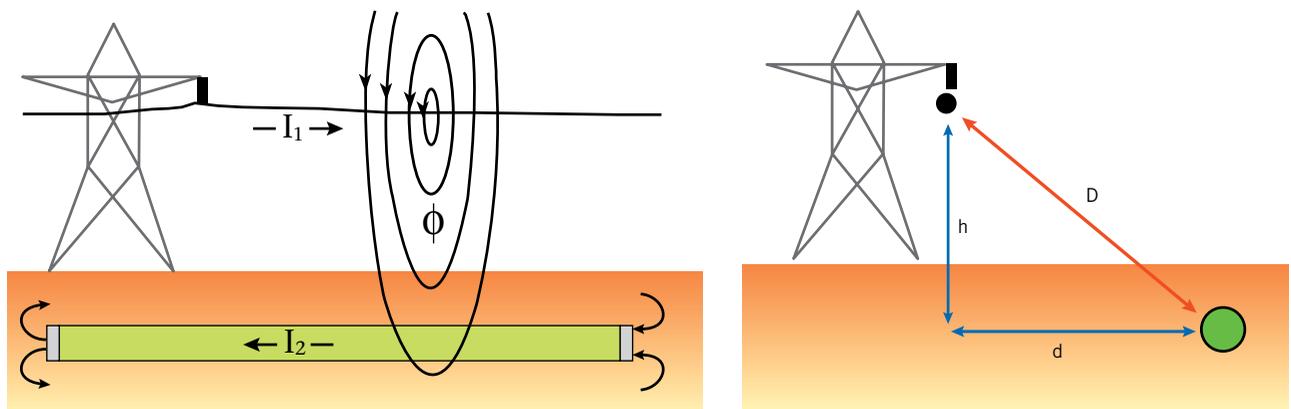


Figura 1. Inducción electromagnética AC en una cañería debido a una LAT (Fuente: NACE).

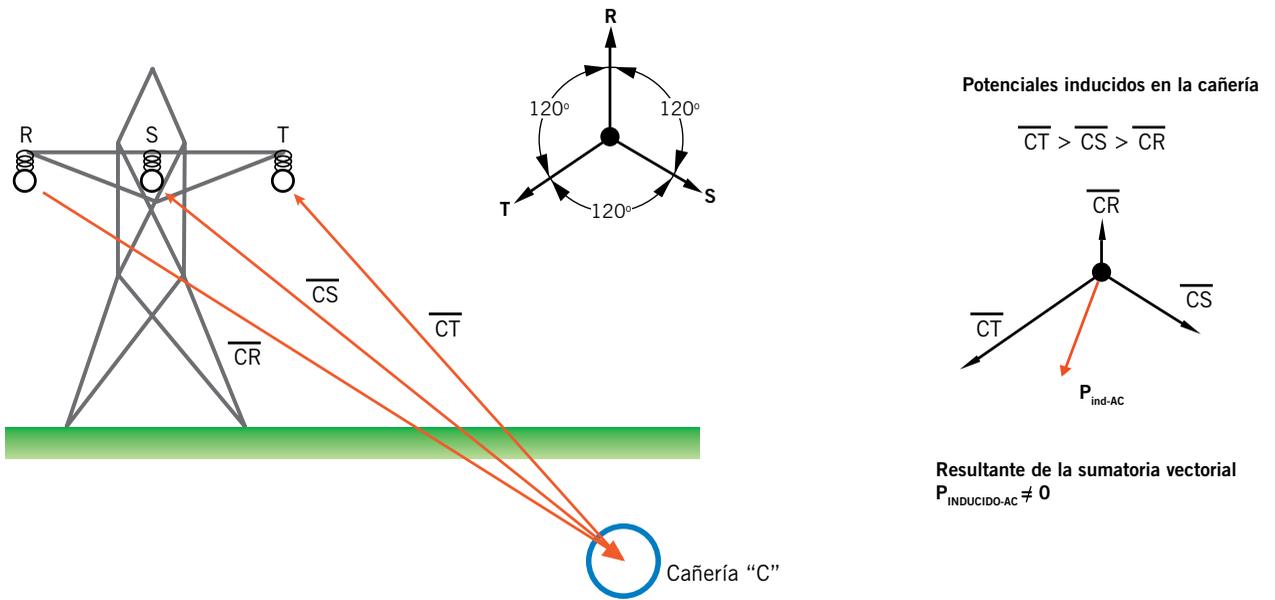


Figura 2. Inducción en la cañería.

Si bien aún los mecanismos de la corrosión -AC no están completamente descritos, la corrosión -AC en cañerías de acero enterradas y protegidas catódicamente se puede explicar conceptualmente.

La tensión de AC inducida en una cañería con y sin protección catódica en un período de 20 ms que corresponde de una onda senoidal de 50 Hz, se muestra en las figuras 3a y 3b.

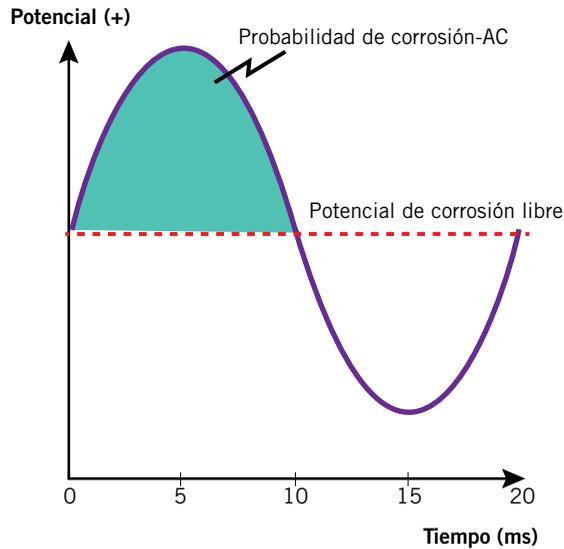


Figura 3a. Cañería con inducción AC sin protección catódica.

La probabilidad de “Corrosión -AC” ocurre cuando la parte positiva de onda de AC se hace más positiva (más anódica) que el “Potencial de Corrosión”. Nótese que, con la aplicación de protección catódica, el área y el tiempo en el cual la cañería es susceptible de corrosión -AC disminuye considerablemente.

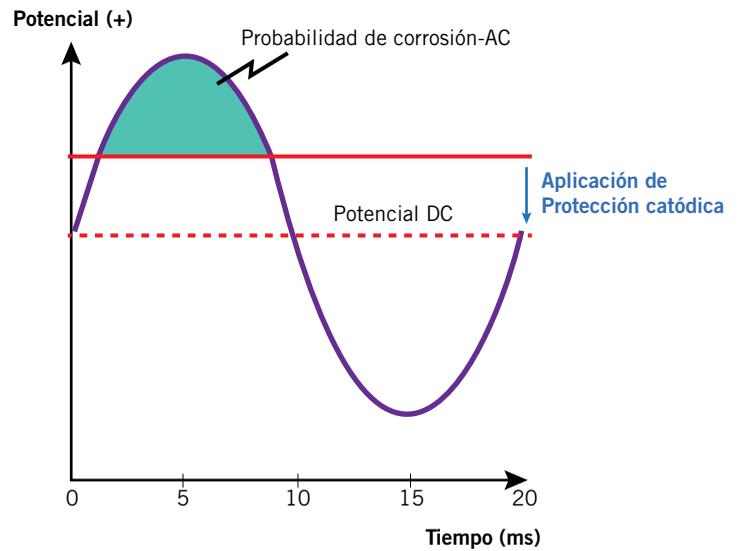


Figura 3b. Cañería con inducción AC con protección catódica.

En la parte negativa de la onda AC, el potencial en la cañería se hace más negativo (catódico) que el “Potencial de Corrosión”, tomando así protección catódica o reforzándola, en caso de tener, se suma a la existente.

Es razonable pensar que el aumento en los niveles de la protección catódica haría desaparecer la probabilidad

de corrosión -AC, pero muchos de los casos reportados de fallas o pérdida de material han ocurrido en cañerías con buen nivel de protección catódica (bien polarizado). Estos reportes también coinciden en que el pH encontrado en la falla era alto.

Incrementar los niveles de protección catódica puede derivar en un mecanismo de alcalinización, al aumentar el pH en torno a una falla de revestimiento porque acumulan iones hidroxilo (OH-) y de Hidrógeno (H+). Esto, en combinación con las oscilaciones potenciales debido a la inducción -AC, podría conducir (a la falla) a entrar y salir periódicamente en el dominio de la corrosión por alto pH según el diagrama de Pourbaix (figura 4).

Este aumento del pH no es inmediato, y muchos autores hablan de la existencia de un "período de incubación", como el tiempo para alcanzar un valor crítico de pH en el electrolito en contacto con el metal.

Al ir aumentando el pH (>12 muy alcalino), las oscilaciones potenciales podrían causar pérdida de material por corrosión, dado que los productos de corrosión pasan de ser un óxido ferroso-diférrico (Fe₃O₄), una película pasiva de baja tasa de penetración, a un ácido ferroso (HFeO₂), con una alta tasa de penetración.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta para cada caso es el que está asociado con la condición del terreno, y determinar si en él las reacciones electroquímicas de corrosión son lo suficientemente rápidas como para producirse en el plazo durante el cual el potencial cruza la zona de la corrosión.

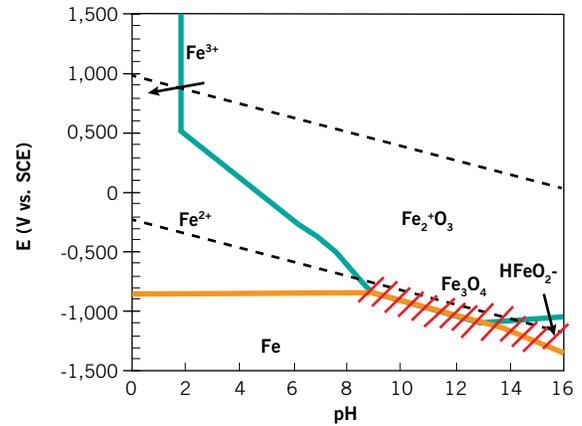


Figura 4. Diagrama de Pourbaix. El área sombreada indica la zona crítica de corrosión AC.

En consecuencia, la corrosión -AC no es evitable/controlable mediante un aumento de los niveles de protección catódica. La alta densidad de corriente debe ser evitada. Por otro lado, intentar disminuir la inducción electromagnética (en valor absoluto) implicaría no requerir de niveles excesivos de protección catódica.

En la práctica está aceptado y verificado por los casos de fallas reportados [3], la relación existente entre la densidad de corriente -AC por metro cuadrado y la velocidad de corrosión, estableciendo un umbral (de densidad) a partir

del cual comienza a desarrollarse un proceso de corrosión -AC en torno a una falla de revestimiento sobre cañería. Esta densidad puede expresarse en función de las siguientes magnitudes en torno a la falla:

$$I_{AC} = \frac{8V_{AC}}{\rho\pi d}$$

Donde: potencial AC es V_{AC} , resistividad es ρ y el diámetro de la falla es d .

Los umbrales tabulados por NACE, a partir de los cuales comienza a producirse corrosión a AC:

$i_{ac} < 20 \text{ A/m}^2$	No hay corrosión
$20 \text{ A/m}^2 < i_{ac} < 100 \text{ A/m}^2$	Corrosión impredecible
$i_{ac} > 100 \text{ A/m}^2$	Se debe esperar corrosión

Desarrollo

Caso de estudio: descripción del sistema

Está constituido por 2 gasoductos paralelos de 12" cada uno y 61 km de longitud, separados unos 20 m (en promedio). El primer gasoducto (Alim. ERP Pto. Madryn) se construyó en 1979 y posee un revestimiento tipo -A1 (Asfáltico); el otro gasoducto (Alim. Aluar) se construyó en 1998 y posee un revestimiento tipo-G4 (Tricapa). Ambos comparten el punto de transferencia con el Gasoducto San Martín, operado por TGS.

Paralelamente a los dos gasoductos mencionados, y por aproximadamente 46 km, corre el electroducto "Futaleufú-Aluar", compuesto por una doble terna de 330 kV de configuración horizontal, con una separación promedio entre ternas de 100 m, vanos de 450 m y 10,5 m de separación entre fases.

El diagrama unifilar (figura 5) y la fotografía de la figura 6 ejemplifican el sistema descrito.

La separación entre los electroductos y los gasoductos es de 50 m (promedio) y los puntos con las singularidades más importantes a tener en cuenta se presentan en:

- Prog.1: Acercamiento a las LAT.
- Prog.11+300: Transposición total de las ternas en las LAT.
- Prog.47+630: Los gasoductos cruzan a 20° las LAT y se alejan.

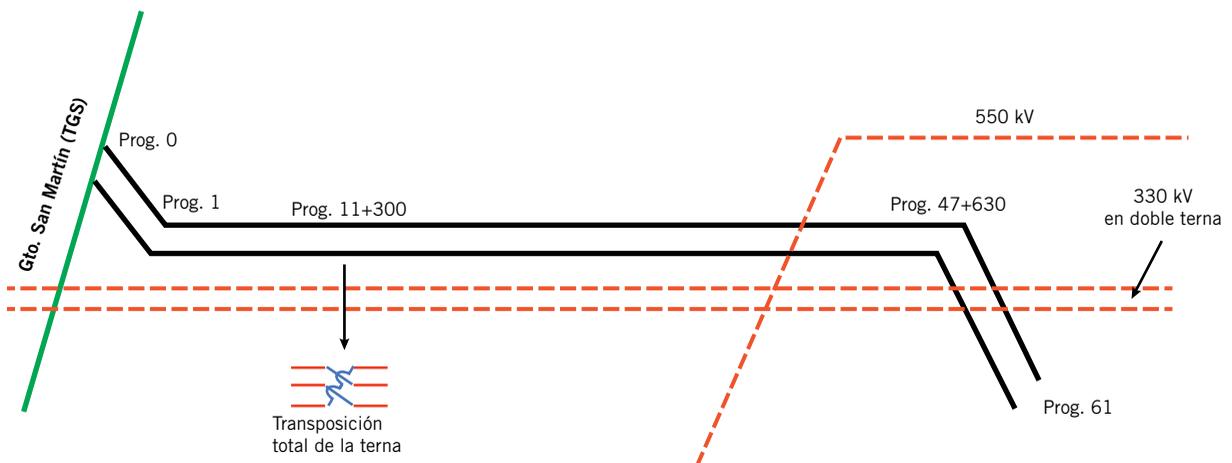


Figura 5. Electroducto paralelo a gasoducto.

El caso de estudio se complementa con el cruce a 35° del Electroducto de Alta Tensión de 500 kV (Tramo: Puerto Madryn - Pico Truncado), energizado en 2012.



Figura 6. Protección de los gasoductos.

Antecedentes

Desde su construcción, ambos gasoductos fueron planteados con sistemas de protección catódica independiente; las interferencias electromagnéticas se mitigaron (para cada cañería) utilizando indirectamente el sistema de protección catódica. Estos sistemas planteaban una relación de compromiso entre el control de los niveles de protección catódica y la mitigación de la inducción -AC. Con el tiempo, y debido a diferentes factores, estos sistemas se fueron degradando y los valores de alterna inducidos se elevaron mucho más allá de lo recomendado por las normas (*NACE Standard RP0177*) y los niveles de protección catódica disminuyeron (en valor absoluto).

El gasoducto más antiguo (con revestimiento A1) es el más cercano a las LAT y atravesó distintas configuraciones de su sistema de protección catódica; galvánico desde su habilitación (1979) a un sistema mixto (galvánico + impresa) a partir de 1992. En 1984, Gas del Estado realizó el primer estudio sobre inducciones electromagnéticas y construyó las primeras estaciones de mitigación [4]. El sistema consistía en el reaprovechamiento de las inducciones sobre la cañería para reforzar la protección catódica, enviando a tierra el semiciclo positivo de la inducción, por medio de diodos y dispersores de corriente construidos con caños de 2". El agotamiento de esos dispersores derivó, con el tiempo, en un obsoleto el mecanismo de mitigación y caída de los Potenciales ON, a lo que se le debe sumar el envejecimiento del revestimiento.

Posteriormente, se instalaron refuerzos del sistema de protección catódica (generadores eólicos, paneles solares, termogeneradores y rectificadores), los cuales, entre la complejidad por diversidad de equipamiento, no dieron los resultados esperados.

En el caso del gasoducto más nuevo (con revestimiento G4), ya en la etapa de diseño y construcción se tomó en cuenta el efecto de la inducción electromagnética. Se diseñó y construyó con un sistema de protección galvánica con barras de zinc (en baterías), instaladas en la totalidad de los mojones kilométricos del paralelismo (46 km).

Esta configuración proporcionaba protección catódica, y todo potencial más positivo a -1.100 mV , se dispersaría a tierra controlando los niveles de inducción.

Inicialmente, este sistema funcionó correctamente, pero con el tiempo, al igual que con el gasoducto con revestimiento A1, el sistema se fue degradando. Esto se debió principalmente a la enorme masa anódica que le fue instalada.

Una vez que la cañería se polarizó, los requerimientos de corriente a las barras de zinc fueron prácticamente nulos, iniciándose en estas un proceso de autocorrosión que dio como resultado la generación de un óxido pasivante de alta resistencia iónica. Los potenciales del ánodo a circuito abierto (-870 mV promedio) y su corriente ($<10\text{ mA}$ promedio) medidos, no explicaban semejante grado de disolución para los años de operación de la cañería. Se decidió hacer la extracción de un ánodo Zn de una batería



Figura 7. Ánodo de Zn.

(previa detección) para verificar la hipótesis. En la fotografía correspondiente a la batería de la Progresiva 1 del gasoducto (figura 7), se puede verificar que la barra está cubierta por la película pasivante, y su estado intacto luego de casi 18 años.

Los sistemas de protección planteados para ambas cañerías (galvánicos y/o mixtos) por la longitud y cantidad de puntos de inyección, hacían compleja la tarea de determinar por medición directa el potencial de polarización (Potencial OFF); medir estos potenciales es una situación deseada que formó parte de las premisas en la etapa de diseño de las mitigaciones AC.

Mediciones iniciales

Dado los niveles de protección catódica que presentaban ambos gasoductos, se decidió retirar (desconectar) todas las inyecciones de protección catódica (baterías de ánodos, termogeneradores, paneles solares y rectificadores), con el fin de maximizar los efectos de la inducción -AC y se realizó un muestreo de POT_{NATURALES} y AC_{INDUCIDA}. La corriente transportada por las LAT era de 580 A en conjunto [5]. En ambos gasoductos se verifica que se producen picos de inducción en las progresivas que presentan discontinuidades geométricas entre el Electroducto y los Gasoductos (ver "Antecedentes").

La figura 8 muestra los valores obtenidos sobre el gasoducto con revestimiento asfáltico (A1). Su valor más alto de potencial alterno inducido se registra en la Prog. 1 con 12,2 V_{AC}. Dentro de la normativa, si bien los valores naturales de DC están dentro de lo razonable, se observa que son muy bajos (más electropositivos). Un dato interesante que verifica el degradamiento del revestimiento con el paso del tiempo: en 1981 [6] Gas del Estado registraba 33 V_{AC} en la Prog.1 y 19 V_{AC} en la Prog.13.

En el otro gasoducto con revestimiento Tricapa (G4), la situación es completamente diferente y se debe principalmente a la calidad del revestimiento. La figura 9 muestra los valores obtenidos. El valor más alto de potencial alterno inducido se registra en la Prog.1 con 131 V_{AC}. Los otros picos se verifican en las Prog.13 y 46 (inversión de terna y fin del paralelismo). Que el valor más bajo se presente en la mitad de la longitud del gasoducto (Prog. 35) verifica el

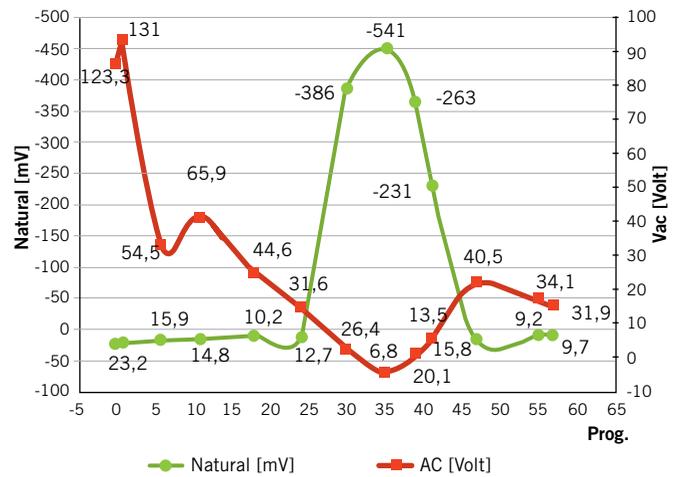


Figura 9. Gasoducto con revestimiento Tricapa (G4).

concepto teórico de línea larga o infinita vista desde ese punto, a ambos lados, en el cual la inducción es mínima por efecto que la carga que ve el gasoducto es infinitamente grande.

Lo llamativo se presentó en la medición de los potenciales naturales, que verifica que cuando en la cañería se inducen valores de alterna > 15 V_{AC}, estos se vuelven más electropositivos, o directamente positivos, como resultó ser en este caso. Se ejecutaron distintas metodologías de medición para descartar un posible error del método.

Diseño de estaciones de mitigación y protección catódica

El sistema actual plantea varios problemas de incompatibilidad entre los sistemas de protección catódica instalados, los mecanismos de mitigación -AC, etcétera. Para el rediseño de estos, se establecieron objetivos y/o metas que se deseaba que cumplan una vez construidos y puestos en operación, los cuales se mencionan a continuación:

- Potenciales de polarización que aseguren su integridad de la cañería según normas vigentes [7].
- Protección catódica por corriente impresa, y compartido para los 2 gasoductos.
- Optimización y maximización de las instalaciones existentes.
- Mitigar los posibles efectos de corrosión -AC debido a las inducciones electromagnéticas, mediante puestas a tierra estratégicamente ubicadas y económicamente viables.
- Cumplir la Ley N° 19.587, en lo referente al riesgo eléctrico y seguridad de las personas.
- Reducir tiempos y costos de mantenimiento y controles actuales.

Luego de varias campañas de mediciones y recolección de datos en campo, el foco se centró en la cañería con revestimiento Tricapa (G4). Además, con datos aportados por la operadora de los Electroductos (Transpa S.A.), se simuló computacionalmente [8] el comportamiento del sistema de "Electroductos-Gasoductos". La figura 10 muestra el resultado de la estimación que hace el software de los

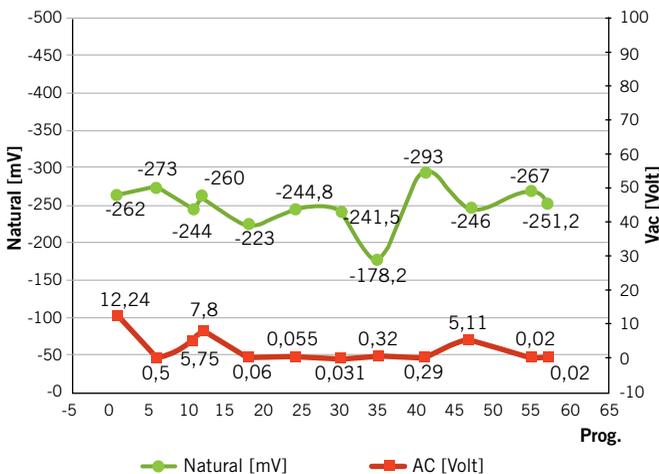


Figura 8. Gasoducto con revestimiento asfáltico (A1).

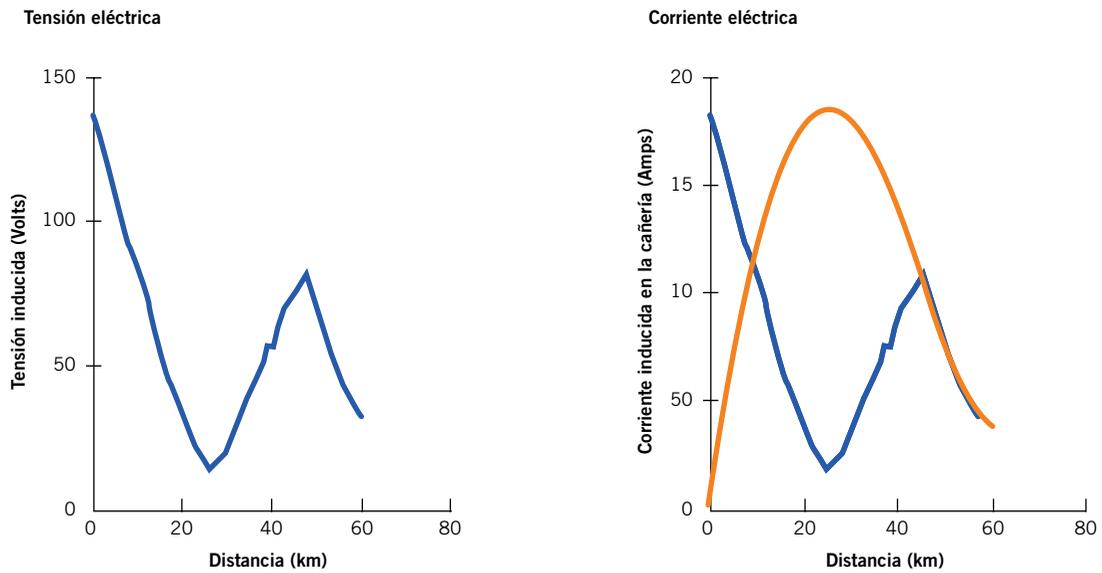


Figura 10. Simulación de control del sistema “Electroductos-Gasoductos”.

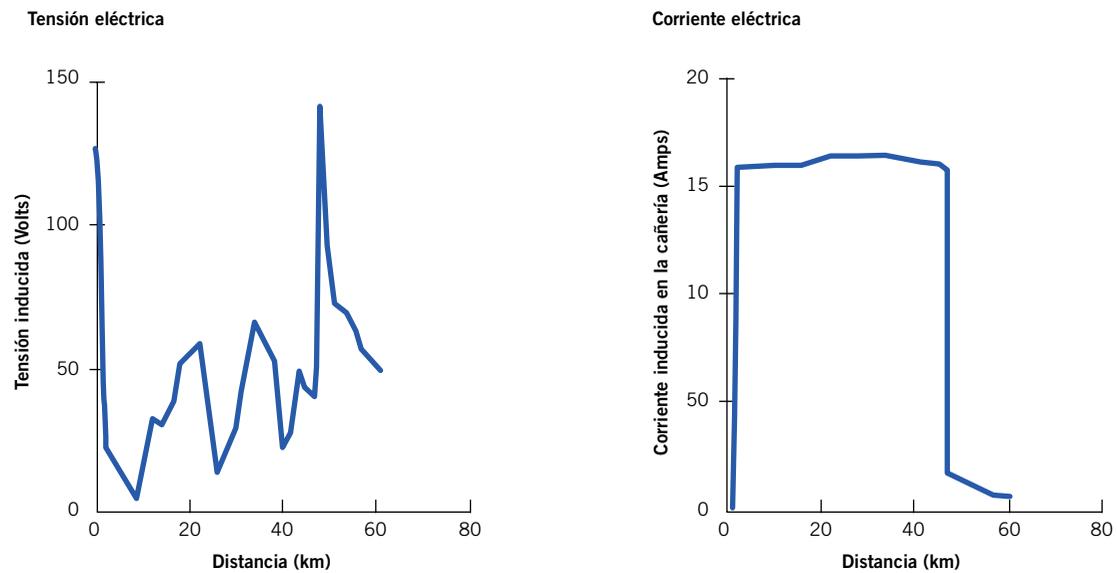


Figura 11. Simulación del sistema “Electroductos-Gasoductos” con las estaciones de mitigación propuestas.

valores de inducción electromagnética para los parámetros ingresados, lo cual, como se puede apreciar, coincide con los valores medidos y mostrados anteriormente, picos de $130 V_{AC}$ y $65 V_{AC}$ (ver “Mediciones iniciales”).

Con ese modelo computacional, que responde lo más fielmente posible a la realidad, se ensayaron en el *software* distintas alternativas y configuraciones de mitigaciones, que cumplieran con las metas anteriormente fijadas. Se propone la construcción de 3 estaciones de mitigación en las Prog. 1+250, 8+850 y 46+900. La configuración elegida para las puestas a tierra es de cables desnudos paralelos, y la compatibilidad con el sistema de protección catódica estará dado por la instalación de discriminadores DC/AC, que bloquean la corriente continua y envían la corriente alterna a tierra.

La figura 11 muestra el resultado de la simulación con las 3 estaciones de mitigación propuestas. En la misma, se acepta $15 V_{AC}$ como el límite máximo de valor de inducción-AC fijado en la norma NACE RP 0177.

Construcción de las estaciones de mitigación

La ubicación de las mismas, en función de los estudios realizados, es la siguiente:

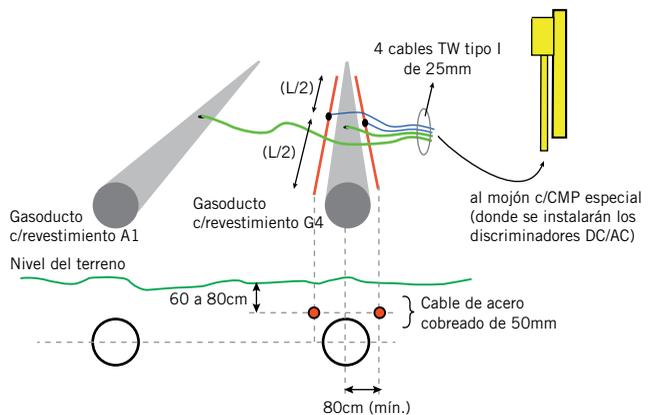
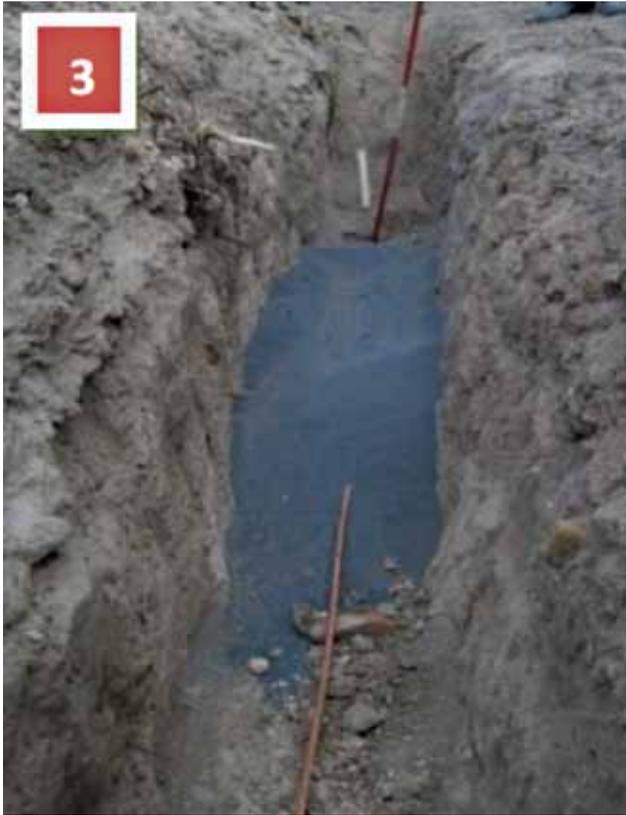


Figura 12. Estaciones de mitigación.



- (1) Zanjas paralelas a ambos lados del gasoducto c/ revest. G4.
- (2) Preparación de mezcla para puestas a tierra.
- (3) Cable acero cobreado + mezcla.
- (4) Cableado y conexión de PAT con la cañería.
- (5) y (6) Mojón especial con el discriminador DC/AC.





- Estación 1 - Prog. 1+ 250, largo (L): 300 mts (de cada lado), Relleno: mezcla especial.
- Estación 2 - Prog 8+ 850, largo (L): 100 mts (de cada lado), Relleno: sin relleno.
- Estación 3 - Prog. 46+ 900, largo (L): 200 mts (de cada lado), Relleno: sin relleno.

En la figura 12 se ejemplifica la instalación a construir.

Dado que entre las Progresivas 0 y 5 se verificaron los niveles de inducción -AC más altos (entre 130VAC y 170VAC), la Estación 1 debía ser la de mayor eficiencia. Se instalaron los conductores de acero cobreado inmerso en 9 toneladas de mezcla especial para puestas a tierra [9]. Las otras 2 estaciones de mitigación fueron instaladas en terreno natural sin relleno. La vida útil teórica de estas estaciones fue calculada en 20 años.

Cada una de las estaciones de mitigación fueron vinculadas a ambas cañerías (conductor verde de la figura 10) para descargar a tierra la corriente alterna inducida. Como se mencionó anteriormente, estas puestas a tierra debían ser compatibles con el nuevo sistema de protección catódica y principalmente debía permitir la realización de ensayos ON/OFF por medición directa en todas las CMP. Esto no solo permite controlar los niveles de polarización (POT_{OFF}), sino que prepara las cañerías para ejecutar en el futuro estudios especiales del tipo CIS/DCVG.

La premisa anterior se cumple con la instalación de discriminadores DC/AC10; estos dispositivos bloquean la corriente continua en un rango (-3VDC a 1VDC) y derivan a tierra toda corriente alterna con frecuencias de 50/60 Hz. Estos discriminadores se instalaron en mojoneros con CMP especiales construidos a tal fin.

Las fotografías 1 a 6 ilustran las etapas de construcción e instalación.

Adecuación del sistema de protección catódica

De los sistemas de protección catódica existentes (baterías de ánodos, generadores eólicos, paneles solares, termo-

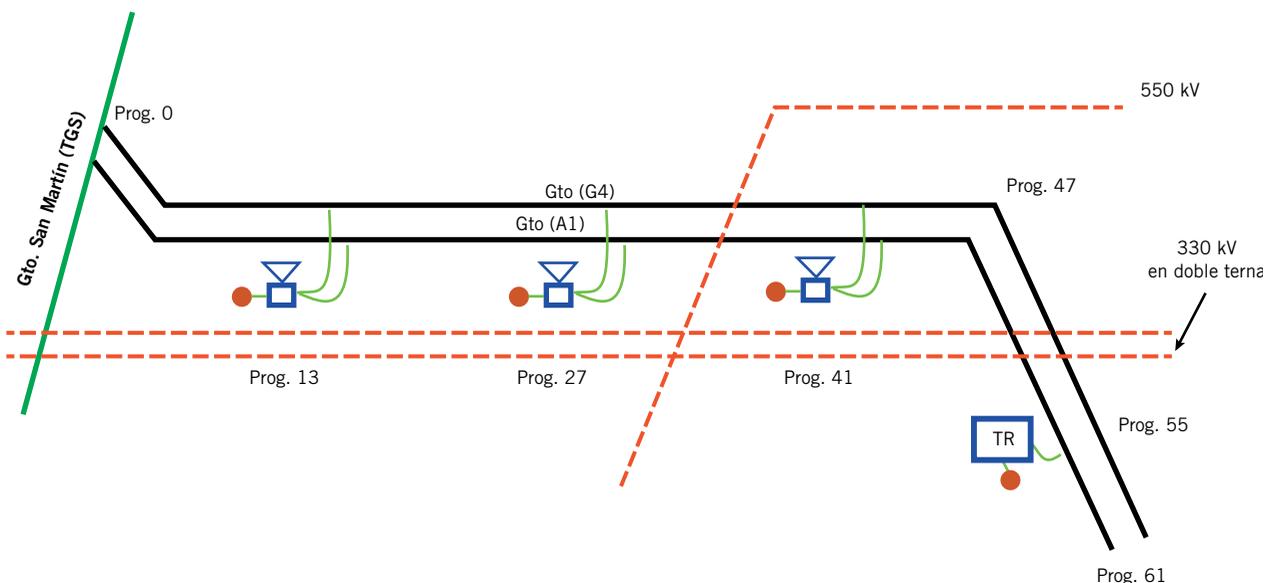


Figura 13. Ubicación de generadores.



Antena GPS (Permanente).

Llave interruptora.
Relé de estado sólido de 40 A.

Módulo de sincronismo GPS para ensayos on/off programable (Permanente).

Figura 14. Modificación del sistema de inyección de corriente.

generadores y rectificadores), solo se mantuvieron los termogeneradores de las Prog. 13 y 27, y el rectificador de la Prog. 55, pero a los tres se les renovaron sus dispersores superficiales a profundos (100 m) con ánodos de grafito de 3". A estas adecuaciones se le debe sumar una nueva instalación (termogenerador + dispersor profundo) en la Prog. 41.

Con la configuración mostrada en la figura 13, los tres termogeneradores proporcionan corriente de protección catódica a ambas cañerías y, dado que los requerimientos de corriente de protección son diferentes para cada una, existen cajas colectoras con resistencias variables que limitan la inyección al gasoducto con revestimiento G4.

El sistema de protección catódica (gasoductos A1 y G4) ahora consta de solo cuatro instalaciones de muy bajo mantenimiento y oscilaciones en el año debido a sus dispersores profundos.

Otro punto importante, previo a realizar las primeras mediciones ON/OFF, fue que se trabajó en la modificación del sistema de inyección de corriente de los termogeneradores, dotándolos (permanentemente) de la funcionalidad de realizar ensayos ON/OFF con sincronismo satelital programable. Esto elimina los errores de medición por desfase en el sincronismo. Además, ahorra tiempo, ya que no es necesario sincronizar y/o re-sincronizar los equipos antes de iniciar la medición, simplificando la tarea de medición de potenciales, ya que se puede programar día y hora del inicio y fin de un ensayo con varios meses de anticipación. La figura 14 ejemplifica la modificación implementada.

Mediciones finales

Finalizadas la construcciones de las estaciones de mitigación e instalados los discriminadores DC/AC, se realizaron las primeras mediciones de RPAT, VAC y IAC (antes y después de conectar las mitigaciones).

Las figuras 15 y 16 muestran los resultados de las mediciones tomadas en ambos gasoductos. Para simplificar el análisis se grafican también en líneas de puntos las mediciones originales (sin mitigación). Las siguientes mediciones se tomaron sin la protección catódica aplicada.

Es importante destacar el orden de conexión de las estaciones de mitigación para la interpretación de las corrientes AC descargadas a tierra (de la estación 3 a 1), ya que las magnitudes van disminuyendo por la suma de los efectos.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos inmediatamente después de poner en funcionamiento las puestas a tierra. En las primeras mediciones de R_{PAT} se puede ver claramente el resultado de la de utilización de la mezcla especial (para puestas a tierras) que se colocó en la Estación 1. En total, las 3 estaciones en conjunto drenaron (inicialmente) a tierra más de 32 A de corriente alterna.

Estación de mitigación	RPAT [Ω] (*)	Tensión AC [Volt] (inducida)		Corriente AC (**) [Amper]
		Antes	Después	
No Prog.				
3 46+900	2,7	55,2	2,14	12,7
2 8+850	4	68,8	2,75	10,8
1 1+250	0,4	170,3	5,52	8,5

(*) Medido con telurímetro.

(**) Medido con pinzas amperométricas a la salida de los discriminadores DC/AC.

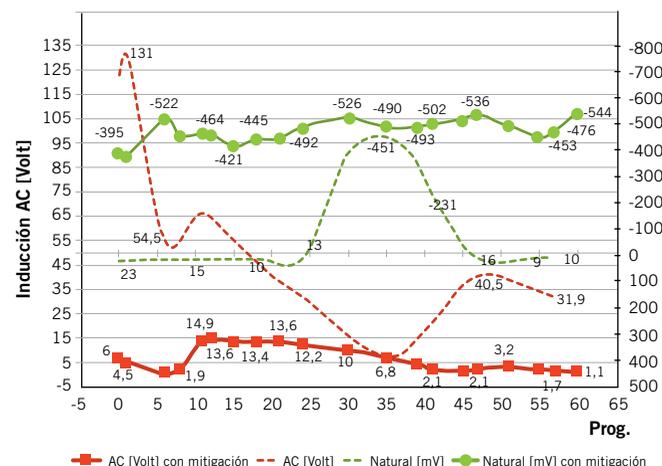


Figura 15. Gasoducto con revestimiento tricapa (G4).

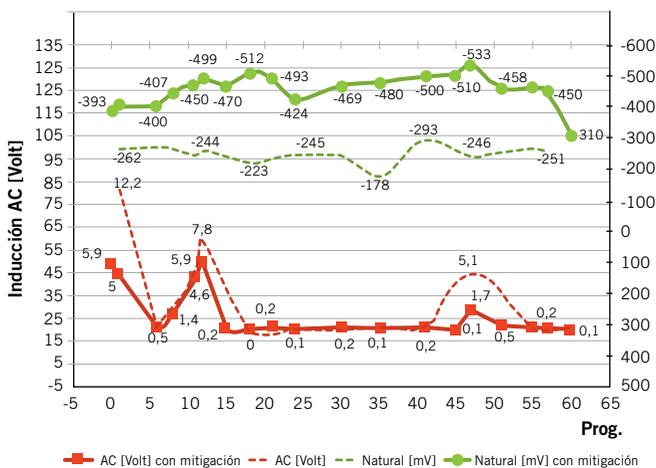
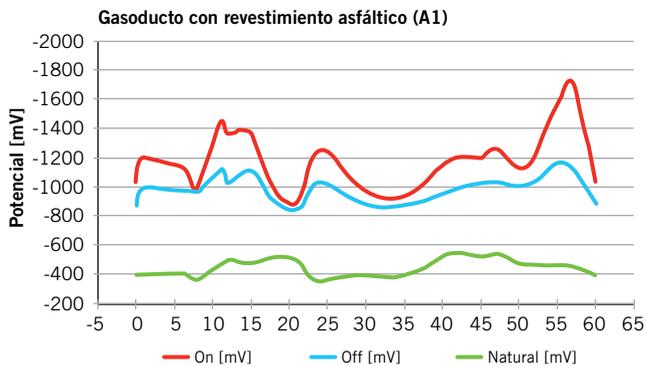


Figura 16. Gasoducto con revestimiento asfáltico (A1).

En la figura 15 se muestran los resultados de las mediciones tomadas en el gasoducto con revestimiento tricapa (G4). Los resultados evidencian una importante disminución en la Inducción-AC inducida en la cañería, y verifica los valores estimados en la simulación computacional. Entre las Prog. 11 y 12 se registra un pico de aproximadamente $15 V_{AC}$; esto es debido a la discontinuidad geométrica que provoca la inversión de terna en ese punto. Esta situación no está contemplada en los *software* de cálculo; de todas formas, la aproximación realizada mantuvo (en la práctica) el orden de magnitud de un máximo de entre 15 y $20 V_{AC}$, siendo el límite de inducción fijado por la NACE RP0177 de $15 V_{AC}$.

En la medición de potenciales naturales se refleja un contraste significativo. Con el sistema de mitigación operando, los potenciales se ubican en el orden de los -500 mV (línea verde continua), muy razonable y esperable para una cañería de acero enterrada de esa antigüedad. Se recuerda que en la medición anterior sin los sistemas de mitigación de inducciones-AC, se midieron potenciales naturales “positivos” que coincidían con las áreas de mayor inducción electromagnética. Esto confirma la hipótesis que la alterna presente en la cañería produce (en este caso) un efecto de desplazar los potenciales naturales a “positivos” por auto-rectificación de la alterna inducida, comprometiendo la integridad de la cañería ante una potencial falla en el revestimiento.

En la figura 16 se muestran los resultados de las mediciones tomadas en el gasoducto con revestimiento asfáltico (A1). Si bien esta cañería no se encontraba tan comprometida como la anterior, principalmente por tener un revestimiento de menor calidad, se observa una importante disminución de los niveles de inducción -AC (línea roja continua), principalmente en los picos. También se observa en la Prog. 11 el efecto de la inversión de terna de los electroductos. Al igual que en el gasoducto anterior, los potenciales naturales medidos con el sistema de mitigación operando están en el orden de -400 mV (línea verde continua), esperable para una cañería de acero enterrada de más de 30 años, que confirma que la primera medición sin sistema de mitigación también se encontraba interferida por la inducción -AC (línea verde punteada).



Gasoducto con revestimiento tricapa (G4)

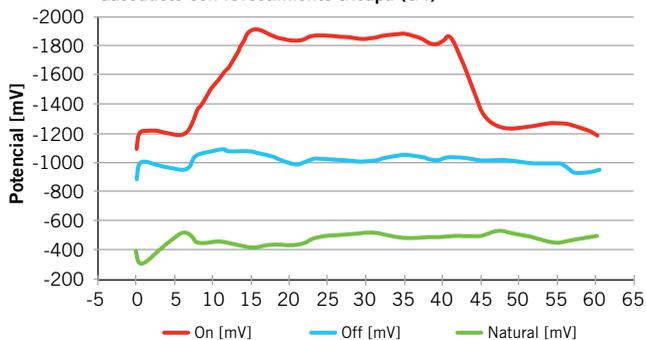


Figura 17. Respuesta de ambas cañerías al nuevo sistema de protección catódica.

Respuesta del sistema de protección catódica

La figura 17 muestra la respuesta de ambas cañerías al nuevo sistema de protección catódica. Luego de nueve meses de polarización y ajustes, se realizan las primeras mediciones ON/OFF de las cañerías, verificando que más del 90% de los potenciales OFF son más negativos que -850 mV, cumpliendo de esta manera el criterio más exigente de la norma NAG-100 (Apéndice D, Criterio 1.2).

Estudios de integridad

Posteriormente a las obras de construcción de las estaciones de mitigación y rediseño del sistema de protección catódica, se inició un estudio de integridad basado en el análisis ECDA. En la etapa de pre-evaluación, se decidió ejecutar una inspección DCVG completa en ambas, complementadas con relevamientos de tapada, resistividad y pH. El relevamiento de potenciales paso a paso (CIS) se decidió no ejecutarlo debido a que no se disponía de suficiente información (con mediciones de respaldo) sobre potencial riesgo por inducción que implicaba a la seguridad a los técnicos la caminata con una bobina de alambre cobre de 6 Km debajo de las LAT.

En el gasoducto con revestimiento tricapa (G4), no se detectaron indicaciones de DCVG en los 60 km; por otro lado, en el gasoducto más viejo con revestimiento asfáltico (A1), se detectaron 944 indicaciones con la siguiente distribución:

- Categoría 1: $I_{xR} < 15\%$: 225 indicaciones
- Categoría 2: $15\% < I_{xR} < 35\%$: 411 indicaciones
- Categoría 3: $35\% < I_{xR} < 60\%$: 248 indicaciones
- Categoría 2: $I_{xR} > 60\%$: 60 indicaciones

Que verifica los altos requerimientos de corriente $> 75 \text{ Amper}$ (1.28 mA/m^2) que demandaba esta última cañería a los equipos de protección catódica instalados.

Al momento de elaborar el presente trabajo, la etapa 3 “inspecciones directas” del análisis EDCA se encuentra en etapa de planificación.

Conclusiones

En este trabajo se verifican los efectos de los paralelismos entre electroductos de alta tensión y cañerías de acero enterradas; también se verifica cómo se producen picos de inducciones en las discontinuidades geométricas del conjunto “Electroductos-gasoductos”. Por otro lado, no se verificaron inducciones electromagnéticas de la LAT de 500KVolt que cruza a los gasoductos en un ángulo $> 35^\circ$.

La construcción y puesta en marcha de las tres estaciones de mitigación AC permitió pasar de inducciones máximas medidas de $170 V_{AC}$ a valores pico de $14.9 V_{AC}$ en la Prog 11.5, que coincide con la ubicación inversión de terna de los electroductos. Posteriormente, se construyó una cuarta estación de mitigación en la Prog. 12 de las mismas características que las anteriores, y en esta nueva situación el pico máximo medido en la última campaña fue de $7.6 V_{AC}$; de todas formas, se debe tener presente que estos valores dependen de las corrientes transportadas por las líneas de alta tensión.

El resto de los valores de inducción AC menores a $10V_{AC}$ se encuentran dentro de lo permitido por las normas ($< 15VAC$), y no representan un riesgo a las personas; por otro lado, en ese rango de inducciones, la densidad de IAC se debería mantener por debajo de $20A/m^2$, por lo que se estima que la probabilidad de corrosión AC es baja.

La configuración del nuevo sistema de protección catódica permitió desplazar los potenciales OFF a valores más negativos de $-800mV$, cumpliendo lo indicado en el Apéndice- D (NAG100), y que con las modificaciones implementadas en los termogeneradores es posible tener control más real de los niveles de polarización de las cañerías.

Finalmente, la ejecución de los pozos de inspección para evaluación directa del análisis EDCA, junto a la ins-

pección DCVG ya realizada, marcará una nueva línea base para el gerenciamiento de la integridad de estas cañerías.

Bibliografía

- NAG-100: “Normas Argentinas Mínimas de Seguridad para el Transporte y Distribución de Gas Natural y otros Gases por Cañería”.
- NAG-108/09: “Revestimiento Anticorrosivo de Tuberías en Condiciones de Operación Normales”.
- NACE RP0177-2000: “Mitigación de los efectos de la corriente alternada y la descarga de rayos sobre las estructuras metálicas y sistemas de control de la corrosión”.

- NACE RP0502-2002: "Pipeline External Corrosions Direct Assessment Methodology".
- NACE RP0169-2002: "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems".
- Prieto, Roberto y Binderas, Eduardo (Ings. - G.E.) (1984). "Medición de tensiones inducidas por transmisión de energía en gasoducto".
- Duwensee, Pedro (Ing. - TGS). "Aprovechamiento de la tensión alterna inducida por una línea de alta tensión para PC, Gasoducto Cordillerano".
- Nielsen, L.V. y Baumgarten, B. (2004). "Onsite measurements of AC induced corrosion: effect of AC and DC parameters" (CeoCor conference junio de 2004, Dresden).
- Liviu Anc, Vlad Pavlovschi (2008). "Mitigation of the influence of high voltage electrical aerial lines over buried metal pipelines" (Transgaz, Rumania).
- "NACE CP3 - Cathodic protection technologist" (2004), Chapter 3 Interference.
- "AC induced corrosion - Summary of AC corrosion cases". JCSE: *The Journal of Corrosion Science and Engineering* / ISSN 1466-8858 / Volume 4 Preprint 5.

Referencias

- [1] "AC Corrosion - A New Challenge to Pipeline Integrity". CORROSION/98, paper n° 566 (Houston, TX: NACE, 1998).
- [2] LAT: Línea de Alta Tensión.
- [3] "AC induced corrosion - Summary of AC corrosion cases". JCSE: *The Journal of Corrosion Science and Engineering* / ISSN 1466-8858 / Volume 4 Preprint.
- [4] Prieto, Roberto (Ing. - Gas del Estado) (1984). "Medición de tensiones inducidas por línea de transmisión de energía en gasoducto y su aprovechamiento en protección catódica.
- [5] Fuente: TRANSPA "Empresa de transporte de energía eléctrica por distribución troncal de la Patagonia", operadora del Electroducto.
- [6] Ídem [4].
- [7] Apéndice D - (NAG-100) - Mediciones ON /OFF y PR0177 (NACE).
- [8] "Pipeline Research Council International", Inc. PRC's AC Coupling Prediction software.
- [9] "Loresco Powerfill grounding backfill". ■